

自校正和自适应控制

理论与应用

[英] C. J. 哈里斯 主编
S. A. 比林斯

科学出版社

73.81-2
6

自校正和自适应控制

理论与应用

[英] C. J. 哈里斯 主编
S. A. 比林斯

李清泉 译



科学出版社

1986

8610900

DL65.02

内 容 简 介

本书是当前自适应控制理论和应用领域中的一本基础性的教科书,主要阐述这一领域的各种问题并反映这一领域的现状和最新研究成果。

全书共十四章,主要内容有:自校正控制理论,模型参考自适应控制理论,变结构控制系统理论,意义不明系统的控制理论,自校正控制器的计算机实现,以及自适应控制在化工对象、透平增压柴油发动机和船舶控制等方面的典型工业应用。

读者对象:高等院校自动控制、计算机应用以及相近专业的学生、研究生和教师,从事自动控制和计算机应用的有关科技人员。

C. J. Harris S. A. Billings (Ed.)

SELF-TUNING AND ADAPTIVE CONTROL

Theory and Applications

Peter Peregrinus Ltd, 1981

自校正和自适应控制

理 论 与 应 用

C. J. 哈里斯 主编
〔英〕 S. A. 比林斯

李清泉 译

责任编辑 李淑兰

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1986年9月第一版

开本: 787×1092 1/32

1986年9月第一次印刷

印张: 14 1/4

印数: 0001—4,700

字数: 317,000

统一书号: 15031·740

本社书号: 4671·15—8

定 价: 3.35 元

译 者 的 话

自适应控制理论是现代控制理论的一个重要组成部分。由于它的适应能力强,控制质量高,经济效益明显,所以近十多年来,人们对这种控制的研究一直十分活跃。到目前为止,无论在理论研究中,还是在实际应用方面,都取得了相当可喜的成果。特别是自校正控制和模型参考自适应控制方面的成果,格外引人注目。因此,随着微处理机的迅猛发展和普及,自适应控制器成为价廉、简便易行的工业控制器已为期不远了。

在有随机干扰的条件下,自适应闭环系统是一种非线性随机系统,机理比较复杂,这不仅对它的分析相当困难,而且理解也不容易。因此,为了促进自适应控制的发展和应用,无疑需要一本介绍这个领域的导论性教科书。由哈里斯(C. J. Harris)和比林斯(S. A. Billings)主编的《自校正和自适应控制理论与应用》一书,在一定程度上可以满足这个要求。本书内容全面,编辑得当,参加编写的许多作者都是这方面的专家,书中的许多内容是他们多年来的研究成果,因而使本书能及时反映这个领域的现状和最新成果。现将它译出,供大学有关专业的师生,有关科技人员和对此有兴趣的读者参考。

由于译者水平有限,译文中定有许多不妥之处,敬请读者批评指正。

译 者

1984年10月5日于清华大学

原 序

在过去的十年中,由于出现了自校正控制,而且又能用微处理机简便地将其实现,所以,研究自适应控制的工作已迅速增多起来。与此同时,针对当前几乎是经典的模型参考方法,人们已经解决了确定性系统的自适应控制回路的全局稳定性问题。解决自适应控制问题的方法有模型参考方法和自校正方法,目前的许多工作都集中在研究这两种方法的共同特性和一致性上。然而意味深长的是,模型参考自适应控制的绝大多数工作都是针对确定性系统的,采用的是李雅普诺夫的第二稳定性方法;而自校正调节器方法主要集中在随机系统方面,在这种系统中,参数估计方法起着主要的作用。在模型参考自适应控制方法中,控制的目标是把未知对象的输出渐近地驱动到给定参考模型的输出上;在自校正调节中,先选择一种用于参数已知的对象的设计步骤,然后把这些参数的递推估计值用到未知对象上。在这两种自适应方法中,自适应算法的收敛性或稳定性是决定性的问题。已经证明,在全局上稳定的两种自适应控制方案是等价的,它们产生相同的误差方程和基本上相同的自适应律。

在自适应控制取得最新进展的同时,还举行了一系列的有关自适应系统的国际讨论会,这些会议的地点和时间是:1979年在西德的达姆什塔特和波鸿(Darmstadt and Bochum),1979和1981年在美国的耶鲁(Yale),1979年在美国的伊利诺斯州(Illinois),以及1981年在日本的京都(Kyoto)。这些会议及其报告集的主要目的都在于阐述自适应控制领域中的

各种问题。尽管人们已承认这些会议的重要性,但 IEE 的控制理论专业小组委员会仍然意识到,由于自校正调节的最新发展以及用微处理机就能将其实际实现,所以自适应控制在工业上日益显得重要,因而有必要向广大读者传播这方面的知识,而且在程度上应是导论性质或辅导性质的。因此,在 1981 年 3 月 26—27 日举行了首届牛津 IEE 自适应控制专题讨论会,以便对现有的自校正和模型参考控制技术及其在工业实现中的有关问题进行一次综述。这次专题讨论会的目的是打算均衡地涉及下列各个方面的问题:自校正理论、模型参考自适应控制理论、变结构控制系统理论、意义不明的系统的控制理论,以及自适应控制在化工对象、透平增压柴油发动机和水上船舶控制等方面的一系列典型工业应用。虽然这个专题讨论会的主要目的在于工业方面,但为了促进自适应控制在其他方面的进一步应用,也打算向学术界提供这个课题的一个工程评述。在这本自适应控制理论和应用导论性的基础书籍中,对上述两个目的都做了仔细考虑。参加这个专题讨论会的十四位作者,针对现代自适应控制各个方面的问题,比较均衡和完整地各自写了本书的一章。

本书首先讲述自适应控制系统的导论,并对这个课题的历史做一简短考察;评述了非线性随机控制的一般理论问题,考虑了运用自适应控制的次最优设计问题;概述了分离性、确定性等价、谨慎控制和试探作用等概念,并对自适应控制的当前方法做了评述。第二章详细推导了单输入-单输出系统的自校正算法以及这个算法的各种变形;讨论了自校正控制各个方面的问题,包括参数估计、最小输出方差调节、广义自校正控制、隐式和显式算法、极点配置设计方法,以及自校正控制的某些最新进展。第三章集中讨论多变量自校正系统,它从考察一个多变量自校正调节器着手,继而导出多变

量系统的次优最小方差调节器和极点配置调节器。第四章评述了在最近二十五年里,稳定性理论在设计自适应控制系统中的作用;重点集中在连续时间系统和由李雅普诺夫与超稳定性技术设计模型参考系统的方案方面。在第五章中,分析了离散时间算法的稳定性和收敛性。进行评价的分析方法有李雅普诺夫方法、超稳定性方法、输入-输出稳定性方法,以及鞅法。第六章考察实现自校正控制器时的实际问题,讨论了算法的鲁棒性和强韧性,介绍了一个稳定算法的 FORTRAN 程序,以及把它用于一个间隙式化学反应器的例子。在第七章中,介绍了基于波波夫(Popov)超稳定性理论的模型参考自适应系统的系统设计方法。第八章考虑简单的结构固定的控制器的设计,对于有关过程的详细动态性质未知的多变量对象,这种设计方法能提供设定值跟踪和扰动抑制性能。第九章评述了变结构系统理论,在这种系统中,当系统状态穿越状态空间的不连续曲面时,反馈控制器的结构就发生变化,以便使系统对对象参数变化和扰动都不灵敏。对于未知或意义不明的多变量系统,可以设计一个结构固定的双调节参数的控制器,第十章考察了这个设计问题。利用这种设计方法可得到一个鲁棒控制器,它保证系统的闭环稳定性,以及对系统动态特性的未知部分的不灵敏性。在第十一章中,考察了单变量和多变量自校正控制器的应用,推导了多变量广义自校正算法,这种算法既包括了设定值跟踪也包括了前馈控制作用。通过把这种控制器用于精馏塔端部产品组分的调节,评价了这种控制器的性能。最后三章讨论自校正技术在发动机控制、水上船舶航向的保持和操纵以及船舶定位系统中的应用。对每种应用都进行了详细的研究,还讨论了控制器设计和现实中有关的所有问题。

最后,编者特向本书的所有作者、为本专题讨论会做了有

效组织工作的 IEE 的朱莉·韦蒂 (Julie Waite) 小姐、本讨论
会主席韦斯科特 (Westcott) 教授和萨金特 (Sargent) 教授，
以及为本书做了优异打字工作的斯旺 (Swann) 夫人等表示
感谢。

哈里斯

比林斯

1981年5月

目 录

译者的话

原序

第一章 自适应控制导论	1
1.1 引言	1
1.2 控制器的设计方法	6
1.2.1 受控过程的数学模型	7
1.2.2 最优控制	7
1.2.3 经典控制	11
1.2.4 系统辨识	12
1.2.5 自适应控制	13
1.2.6 极值控制	16
1.3 随机控制的结构性质	17
1.3.1 控制问题的结构性质	18
1.3.1.1 中性	18
1.3.1.2 分离性	19
1.3.1.3 确定性等价	20
1.3.2 充分条件	22
1.3.3 随机控制律的性质	23
1.3.4 自适应控制中的谨慎控制和试探控制	25
1.4 自适应控制的现状	28
1.4.1 自校正控制	29
1.4.2 模型参考自适应控制	33
1.4.3 次最优自适应控制	35
1.4.4 仿真和比较研究结果	37
1.5 结论	42

参考文献	43
第二章 自校正控制器导论	48
2.1 引言	48
2.2 系统模型	53
2.2.1 预报模型	60
2.3 递推参数估计	63
2.3.1 动态模型参数的递推估计	67
2.4 最小方差控制和自校正调节器	71
2.5 广义最小方差控制和自校正控制器	76
2.5.1 预报控制的一些解释	78
2.5.2 自校正控制方面的情况	82
2.5.3 前馈	84
2.6 显式极点配置算法	85
2.6.1 极点配置调节器	85
2.6.2 极-零配置伺服控制器	88
2.7 自校正控制的一些最新进展	91
2.7.1 状态空间方法	91
2.7.2 “混合”自校正方法	95
2.8 结论	97
参考文献	98
第三章 多变量自校正调节器	100
3.1 引言	100
3.2 数学预备知识	102
3.2.1 系统表示	102
3.2.2 采样系统注释	103
3.2.3 互换性问题	104
3.3 离线控制策略	104
3.3.1 最优调节器综合	104
3.3.1.1 最小方差调节	105

3.3.1.2 次优最小方差调节	106
3.3.2 调节器的经典综合方法	107
3.3.2.1 极点配置	108
3.4 自校正算法	110
3.4.1 最优自校正调节器	111
3.4.1.1 最小方差自校正调节	111
3.4.1.2 次优最小方差自校正调节	112
3.4.2 极点配置自校正调节器	113
3.5 例子	116
3.5.1 移动极点的多变量调节器	117
3.5.2 用于环路时间延迟不等的系统的移动极点的多 变量自校正调节器	120
3.6 结论	121
参考文献	124
第四章 连续自适应控制系统的稳定性和收敛性	126
4.1 引言	126
4.2 早期的进展	127
4.3 稳定性问题	128
4.4 基于李雅普诺夫稳定理论的设计方法	130
4.5 正实传递函数的重要性	132
4.6 超稳定性理论在综合自适应控制中的应用	134
4.7 纳伦德拉误差模型	137
4.8 实际应用情况	142
4.9 进一步的研究课题	143
参考文献	143
第五章 离散自适应控制器的一些性质	145
5.1 引言	145
5.2 控制目标	147
5.2.1 模型参考控制	148

5.2.2	控制律的表示	149
5.3	自适应算法	151
5.3.1	预报估计	152
5.3.2	控制律	152
5.3.3	向量 X 的估计	153
5.3.4	估计器的输出误差	154
5.3.5	估计器输入误差——随机算法	155
5.3.6	估计器输入误差——非随机情况	155
5.4	估计器增益	156
5.4.1	简单例子	157
5.4.2	矩阵增益	158
5.4.3	标量增益	159
5.5	估计器的性质	160
5.5.1	表示 E_L ——矩阵情况	160
5.5.2	表示 E_s ——标量情况	161
5.5.3	表示 E_0 ——矩阵情况	161
5.5.4	二次型	161
5.5.5	E_L 的性质——矩阵情况	162
5.5.6	E_0 的性质——矩阵情况	163
5.5.7	E_s 的性质——标量情况	164
5.6	误差反馈系统	165
5.6.1	非随机误差系统——矩阵情况	166
5.6.2	非随机误差系统——标量情况	168
5.6.3	随机误差系统 ($k=1$)	168
5.6.4	控制律误差系统	168
5.7	稳定性	169
5.7.1	矩阵增益算法	170
5.7.2	标量增益算法	171
5.7.3	算法的比较	173
5.7.4	控制误差	174

5.7.4.1	标量情况: $\alpha=0, \beta<1$	174
5.7.4.2	多重递推方法	174
5.8	随机收敛性	175
5.8.1	鞅收敛定理	177
5.8.2	鞅法——矩阵情况	178
5.8.3	标量增益算法——上鞅方法	181
5.8.4	雍的方法	183
5.8.5	算法的比较	185
5.9	结论	186
	参考文献	187
第六章	自校正控制器的实现	189
6.1	引言	189
6.2	基本自校正调节器	191
6.2.1	数据结构和基本子程序	192
6.3	数值上稳定的参数估计	197
6.4	偏移和负载扰动	203
6.4.1	负载扰动	206
6.5	强韧性	206
6.5.1	控制器的强韧性	207
6.5.2	估计的强韧性	208
6.6	参数选择	210
6.6.1	系统参数	210
6.6.2	控制器参数	211
6.6.3	估计器参数	211
6.7	实际例子	212
6.7.1	过程	213
6.7.2	试验	214
6.8	结论	217
	参考文献	218

第七章 离散模型参考自适应系统的系统设计方法

.....	220
7.1 引言	220
7.2 稳定性理论的一些基础知识	222
7.3 超稳定性设计方法	224
7.4 任意模型特性的设计	228
7.5 收敛性的改善	231
7.6 通用自适应控制律	233
7.7 通用控制律	236
7.8 独立参数的确定	239
7.9 通用方法举例	242
7.10 通用设计方法的简化	246
7.10.1 没有延迟时间的对象的简化	246
7.10.2 误差信号 $v(k)$ 的简化计算	247
7.10.3 借助于分割参考模型的简化	247
7.10.4 借助于串联模型的简化	248
7.10.5 一种特定情况——莫诺波利的“增广误差”方法	249
7.11 结论	250
参考文献	250

第八章 未知多变量对象的设定值跟踪和扰动抑制控制器的设计

.....	252
8.1 引言	252
8.2 模拟控制器	253
8.2.1 分析	253
8.2.2 说明例子	255
8.3 数字控制器	258
8.3.1 分析	258
8.3.2 说明例子	260

8.4 结论	262
8.5 附录	263
参考文献	264
第九章 采用变结构系统理论的控制器设计	266
9.1 引言	266
9.2 二阶标量问题	267
9.3 具有标量控制的相变量规范系统	269
9.4 多变量变结构系统	270
9.4.1 滑动	271
9.4.2 控制函数选择	275
9.4.3 递阶控制算法	276
9.5 模型跟踪控制系统	277
9.6 模型跟踪控制系统举例	282
9.7 自适应控制器	285
9.7.1 基本策略	286
9.7.2 修正策略	290
9.7.3 切换超平面	291
9.8 结论	292
参考文献	293
第十章 关于未知或意义不明的多变量系统的鲁棒控制的简单模型	296
10.1 引言	296
10.2 单输入-单输出系统——一种富有启发性的情况	299
10.3 离散一阶滞后系统: 多变量情况	304
10.4 采用一阶近似模型设计未知离散多变量系统的控制	306
10.4.1 一阶近似模型的建立	307
10.4.2 实际反馈系统的稳定性和性能	308

10.4.3 灵敏度和鲁棒性	309
10.5 说明例子	310
10.5.1 液位控制: 单输入-单输出例子	311
10.5.2 开环不稳定的多变量对象的数字控制	313
10.6 量测非线性性的影响	316
10.7 结论	317
参考文献	319
第十一章 单变量和多变量自校正控制器的应用	321
11.1 引言	321
11.2 自校正控制	324
11.2.1 多输入-单输出系统	324
11.2.2 参数估计	328
11.2.3 闭环性质	331
11.2.4 多输入-多输出系统	334
11.3 试验性精馏塔对象和数学模型	336
11.4 仿真和试验结果	339
11.4.1 采用 G_c 补偿器的性能特性	339
11.4.2 负载扰动的抑制	343
11.4.3 精馏塔的控制	344
11.4.4 多变量多速率自校正控制	360
11.5 结论	363
参考文献	364
第十二章 自校正技术在发动机控制中的应用	367
12.1 引言	367
12.2 控制结构	368
12.3 柴油发动机的调节——系统模型	370
12.4 试验台	373
12.4.1 发动机	373
12.4.2 试验台	373

12.4.3	计算机	374
12.5	自校正试验	374
12.5.1	自校正器的建立	374
12.5.2	试验周期	377
12.5.3	控制限度	378
12.6	试验结果	378
12.6.1	初始校正和再校正	379
12.6.2	扰动的抑制	380
12.6.3	其他的试验观察	381
12.7	结论——发动机的管理系统	382
	参考文献	383
第十三章	保持和操纵水上船舶航向的自校正控制器	385
13.1	引言	385
13.2	船舶动态特性的数学模型	386
13.2.1	线性模型	386
13.2.2	非线性模型	388
13.2.3	参数变化	389
13.2.4	海波扰动效应	389
13.3	船舶驾驶的自校正控制	390
13.3.1	自校正控制器算法	390
13.3.2	最优控制与自校正控制的比较	391
13.3.3	非线性船舶模型的自校正控制	393
13.3.4	时变船舶模型的自校正控制	394
13.4	结论	398
	参考文献	398
第十四章	船舶定位系统的自校正控制	401
14.1	引言	401
14.2	系统描述	402
14.2.1	低频运动	402